干旱区地理
ARID LAND GEOGRAPHY

doi:10.12118/j.issn.1000-6060.2019.06.15

皋兰老虎台红砂种群在不同坡向的空间格局及关联性①

刘旻霞, 南笑宁, 夏素娟, 李全弟, 蒋晓轩
(西北师范大学地理与环境科学学院,甘肃 兰州 730070)

摘 要: 种群的空间格局是研究植物种群相互作用及种群与环境关系的重要方法。红砂(*Reaumuria soongarica*)是黄土高原半干旱区的主要物种,通过野外的群落调查,运用空间点格局分析法中的 Ripley *K* 函数,分析甘肃皋兰老虎台荒漠植被不同坡向红砂种群的空间分布格局与种内关联。结果显示:红砂种群为增长型种群,其在不同坡向的分布具有显著差异;南坡及西南坡坡向上,红砂种群Ⅰ、Ⅱ级个体在小尺度上呈显著聚集分布,随着龄级及空间尺度的增加,红砂种群聚集强度逐渐减弱,最后趋于随机分布。西坡、西北坡坡向上生长大量的蓍状亚菊(*Ajania achilloides*)和短花针茅(*Stipa breviflora*)等对红砂的生长造成抑制并加剧种间竞争,各级红砂种群的分布格局均以随机分布为主。不同坡向上,红砂种群Ⅰ、Ⅱ龄级个体之间在小尺度内表现为负关联,随着尺度增加关联度降低,Ⅲ、Ⅳ龄级与Ⅰ、Ⅱ龄级个体之间呈显著的负关联,而Ⅲ、Ⅳ龄级之间没有明显关联性,表明龄级相近的个体在空间分布上是相互独立的。综上所述,在黄土高原半干旱区,影响红砂种群分布的主要因素除了其自身的生物、生态学特性外,微生境的影响也十分重要。

关 键 词: 黄土高原; 红砂种群; 龄级结构; 点格局; 坡向
文章编号: 1000-6060(2019)06-1359-09(1359~1367)

用来解释植物种群的分布格局是如何沿着不同环境梯度变化,几十年来一直是生态学家们关注的重要课题[1],比如放牧和人为干扰以及土壤水分、养分等已经成为物种分布时空变化的重要驱动力[2]。空间格局是植物物种的主要特征之一,其可以较好地解释植物和生境是如何关联和制约、种群之间的生态过程[3-4]。植物种群在空间所处的坐标和它们之间的相互关系能用 Ripley *K* 函数来展示,通常会有 3 中不同的展现形式(即均匀、聚集和随机),与它们相对应的分别是显著负相关、显著正相关和无显著相关性等 3 种关系。点格局分析方法利用空间二维坐标点来分析空间格局,能够更详细地解释物种间的相互作用,还可以在多尺度下分析种群的空间格局和种内与种间的关联性,因此被广泛应用于研究种群的空间分布,认识其生态进程和特征,备受生态学家们的广泛关注[5-7]。

格局分析起始于非随机数量的测定。20 世纪 60 年代以前,分析种群空间格局的主要方法是负二项分布和泊松分布等数学模型进行理论拟合,但常常会出现生物学意义上的混乱甚至矛盾的解释[8]。由于种群格局对尺度的依赖性,RIPLEY 在 1977 年提出了点格局阐述的观点[9],这一观点打破了早期人们常用的简单指标度量种群空间坐标的缺憾。该方法以植物种群个体在二维空间上的坐标为基础数据,构成点图,再以点图为基础进行格局分析。因而检验能力较强[10]。目前,众多的国内外学者们应用点格局方法研究了草地、灌木、荒漠植被及森林种群的空间格局分布及空间关联性,而且在不同空间尺度上详尽地解释了植物种群的生理生态学过程[11-12]。

红砂(*Reaumuria soongarica*),别名:枇杷柴,是柽柳科红砂属植物,小灌木,仰卧,多分枝,叶肉质,鳞片状,花萼钟形,边缘白膜质,具点状泌盐腺体。其大量分布在我国荒漠干旱区,具有较强的集沙能

① **收稿日期:** 2019-01-12; **修订日期:** 2019-04-28
基金项目: 国家自然科学基金项目(31760135,31360114)资助
作者简介: 刘旻霞,女,博士,教授,研究方向为寒旱区环境恢复生态学. E-mail: xiaminl@163.com

力及广泛耐碱性,红砂的生态可塑性和抗逆性都很强,为荒漠区及荒漠化草原区的优势种和主要建群种之一。红砂一般生长在荒漠戈壁滩及丘陵沟壑等较严酷的生境条件下,深入研究红砂种群有助于防风、固沙、防止水土流失及改善生态环境。近些年来,一大批生态爱好者对红砂关注较多,也纷纷做了一些关于其抗性[13]、种子萌发[14]及其他生理生态方面的研究[15],然而在甘肃中部黄土高原沟壑区红砂在微生境梯度上的研究报道较少。鉴于此,本研究以甘肃皋兰县黄土沟壑干旱区内沿坡向条件下以红砂为优势种的全部样地生物信息调查,探明荒漠植物红砂的种群结构,并利用点格局分析法分析各级红砂种群的空间分布特点及种内种间关系,剖析荒漠优势植物红砂的生长状况及其在环境中所处的位置迥异,目的是为半干旱荒漠区植物物种的恢复演替、调整及干旱区生态环境的恢复补充基础资料,为甘肃省水土流失的治理和实现青山绿水的生态环境提供技术支撑。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

研究区设在甘肃省皋兰县水阜乡的老虎台,地处陇中北部黄土丘陵区(36°16′N,103°49′E;平均海拔 1 825 m),该区属温带大陆性气候,水土流失与干旱并存、荒漠化与盐渍化同在,地区自然灾害频繁。年平均降雨量为 263 mm,年际年内降水变率大,70% 的降雨分布在 6 ~ 9 月,最大年降雨量为 392 mm,最小年降雨量为 154. 9 mm;年蒸发量为 1 500 mm。年平均日照时数 2 768. 1 h,无霜期 157 ~ 182 d。年平均气温为 8. 7 ℃,年均最低气温为 -9. 1 ℃;年均最高气温 20. 7 ℃。土壤以淡灰钙土为主,质地轻壤,团粒结构松散,持水保肥能力差。该区天然植被属典型草原向荒漠草原过渡类型。坡向差异造成阴阳坡水热条件差异,呈现出阴阳坡分异的荒漠草原景观。主要植被有旱生小灌木红砂(*R. soongarica*)、甘蒙锦鸡儿(*Caragana opulens*)、荒漠锦鸡儿(*Caragana roborovskyi*)、少量分布有蝎虎驼蹄瓣(*Zygophyllum mucronatum*)、骆驼蓬(*Peganum harmala*)等多年生植物,伴生有一年生狗尾草(*Setaria viridis*)、冠芒草(*Enneapogon borealis*)、棒头草(*Polypogon fugax*)等草本植物,植被盖度 20% ~ 70% 。

1.2 样地设置及调查

2017 年 8 月初在水阜乡老虎台(图 1)进行野外群落学调查。根据点格局要求,使用 360°罗盘测定坡向,在山体中部同海拔高度(1 820 m)沿着南坡(0°)、西南坡(45°)、西坡(90°)及西北坡(135°)的梯度,依次设置了连续渐变的研究样地,北坡没有红砂分布,东坡不设样地的原因是处在山脊的位置。在不同研究样地上分别设置大小为 10 m × 10 m 的样方 3 个,采用相邻格子法把样方划分为同样大小(1 m × 1 m)的 100 个小样方;其坐标原点设在每个样方的左下角,利用平面直角确定红砂个体的相对位置、投影点,并在坐标纸上绘出,同时测定物种的冠幅、高度、密度、分枝数及生物量等信息。

1.3 研究方法

1.3.1 红砂龄级的确定 植株生长程度的大小能指示其发育阶段。有研究发现,灌木的冠幅与高度之间的关系和其发育阶段有显著的正相关关系[16]。本研究通过分析红砂的株高、冠幅以及不同冠幅间的数量特征来确定红砂的径级。因此可将红砂划分为 4 个龄级:Ⅰ级 (冠幅 < 30 cm)、Ⅱ级(冠幅为 30 ~70 cm)、Ⅲ级(冠幅为 70 ~ 110 cm)和Ⅳ级(冠幅 > 110 cm)。

1.3.2 红砂点格局研究 在皋兰县老虎台山地,这些点事件依赖于二维空间分布的点组成,反映点事件空间分布的相互依赖性。点格局分析法即采用 Ripley *K* 函数,以个体组成二维点图为基础进行格局及关联性分析[9]。该方法能对不同尺度下的种群空间格局进行分析,也能反映出各龄级个体间的空间关联,通过 Monte-Carlo 拟合可对坐标信息充分利用,具有较强的检验能力,其描述的结果与实际更

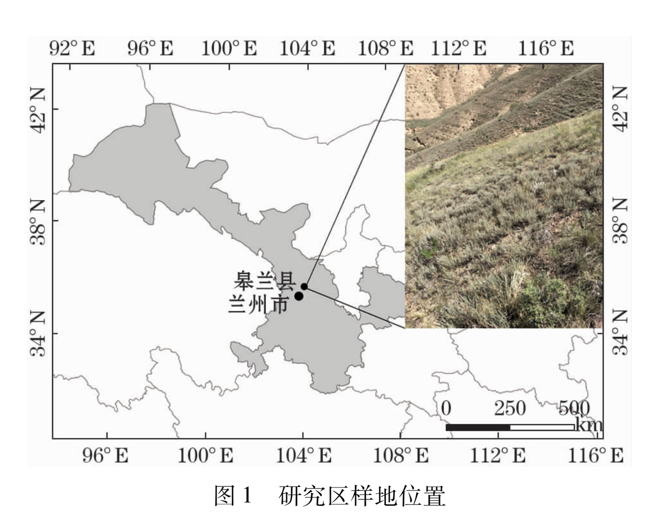


图 1 研究区样地位置

Fig. 1 Sample plot of the study area

吻合,被广泛应用于种群的空间格局分析中,公式具体如下[17]:

$$K(t)=\frac{A}{n^2}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{I_t(u_{ij})}{W_{ij}}\quad(i\neq j)\qquad(1)$$

式中:A 表示样地总面积;n 为样地内红砂种群的数量;u_{ij}表示第 i 株红砂与第 j 株红砂个体的间距;t 表示空间尺度,当 $u_{ij}\leq t$ 时,$I_t(u_{ij})=1$,当 $u_{ij}>t$ 时,$I_t(u_{ij})=0$;W_{ij}为消除边界效应的权重,具体指代以点 i 为圆心;u_{ij}为半径的圆落在面积 A 中的弧长与圆周的比值。

为了在随机分布下保持稳定的方差,且与 t 呈线性关系,通常引入 K/π 的平方根对式(1)改进为 $L(t)$ 函数,从而能够更好的将格局关系表现出来。公式如下:

$$L(t)=\sqrt{K(t)/\pi}-1\qquad(2)$$

式中:当 $L(t)=0$,种群为随机分布;$L(t)>0$,种群为聚集分布;$L(t)<0$ 时,种群为均匀分布。

一般随机分布的上下包迹线利用 Monte Carlo 方法求解,研究的实测值位于上下包迹线范围内为随机分布;实测值位于上下包迹线的中间为聚集分布;实测值位于上下包迹线下面为均匀分布。

1.3.3 种间关联性分析 种群间的空间关联性是指种群之间的点格局分析,也称作多元点格局分析(Analysis on the pattern of multiple points)。为研究不同龄级的红砂个体在空间尺度上的关联性,Ripley K 函数可转换为双变量形式以进行计算,具体如下:

$$K_{ab}(t)=\frac{A}{n_a\times n_b}\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{I_t(u_{ij})}{W_{ij}}\quad(i\neq j)\qquad(3)$$

式中:n_a、n_b 分别代表种群 a 及种群 b 的个体数;其它指标与(1)式含义相同;此时 i 和 j 则表示种群 a 及种群 b 的个体,可改进公式如下:

$$L_{ab}(t)=\sqrt{K_{ab}(t)/\pi}-1\qquad(4)$$

当 $L_{ab}(t)<0$ 时,各年龄级红砂在 t 尺度上的关系为负相关;$L_{ab}(t)=0$ 时,各年龄级红砂在 t 尺度上没有关系;$L_{ab}(t)>0$ 时,各年龄级红砂在 t 尺度上是正相关。

拟合包迹线用 Monte Carlo 方法来检验,用以检验两个种群是否显著地关联。方法同上。

1.4 数据分析与计算

用 Get Data Graph Digitizer 2.25 软件提取红砂坐标数据,用 Excel 2010 软件进行初步的数据整理计算,用 Programita 2014 软件进行分析处理。此研究的空间尺度为 5 m(野外实际测定为 10 m,软件处理后用 5 m),同时用 Monte Carlo 法随机模拟了 99 次,得到了 95% 的置信区间,运用 Sigmaplot 12.0 软件绘图,红砂的生物学特征通过 SPSS 18.0 软件进行单因素方差分析、检验其差异性及关联性。

2 结果与分析

2.1 生境梯度红砂种群不同发育阶段的结构特征

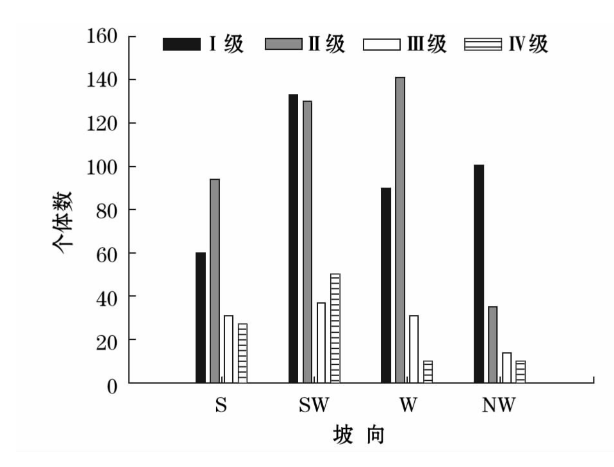
野外实验样方中共调查到 993 株红砂,总盖度为 6.75%。最大冠幅为 135 cm × 105 cm,最小为 28 cm × 20 cm。

在不同坡向,Ⅰ、Ⅱ级红砂种群数量远远大于Ⅲ、Ⅳ级。南坡Ⅰ级为 60 株,Ⅱ级为 94 株,Ⅲ级、Ⅳ级分别为 31 株和 27 株;西南坡,Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级分别为 133 株、130 株、37 株和 50 株;西坡,Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级分别为 90 株、141 株、31 株和 10 株;西北坡,Ⅰ级、Ⅱ级、Ⅲ级、Ⅳ级分别为 100 株 35 株、14 株和 10 株。由此可见,红砂不同龄级个体的分布表现出较高程度的分异。根据样地内不同冠幅个体数的分布来看,红砂种群为增长型种群(图 2)。

从图 3a 可见,红砂冠幅的长(东西)与宽(南北)之间具有显著的正相关关系,从图 3b 可以看出,随着冠幅的增加,红砂的高度呈现出先增加后稳定再逐渐减小的趋势。

2.2 红砂种群点格局分析

红砂种群不同坡向各龄级的分布格局见图 4。在南坡、西南坡、西坡和西北坡 4 个坡向上,各级红砂的分布状况和聚集程度明显不同。南坡Ⅰ级红砂在 0~2.5 m 范围内为聚集分布,在 2.5~5 m 为随机分布;Ⅱ级红砂在各个尺度内均表现为明显的聚集分布,且聚集程度比较高,随着龄级的增加,其分布趋于随机分布;西南坡Ⅰ级红砂在取样范围内均呈聚集分布,而Ⅱ级红砂在 0~4 m 范围内聚集分布,4~5 m 随机分布;西坡及西北坡的Ⅰ、Ⅱ级红砂则与南坡、西南坡的略有不同,其在各个尺度上均表现为随机分布。Ⅲ、Ⅳ级红砂在 4 个坡向均表现为随机分布。



注:S—南坡;SW—西南坡;W—西坡;NW—西北坡。下同

图 2 不同龄级红砂种群的个体数

Fig. 2 Individual number of *Reaumuria soongarica* population of different age grade

2.3 红砂种群个体间的空间关联性

如图 5 所示,在南坡Ⅰ和Ⅱ级红砂在 0 ~2.5 m 范围内为显著负相互作用,其他范围内无关联;Ⅰ和Ⅲ级在 0 ~1.5 m 范围内负相互作用,随着尺度的增加,在 >1.5 m 范围内表现为不相关;Ⅰ和Ⅳ级、Ⅱ和Ⅲ级及Ⅱ和Ⅳ级在尺度范围均为负相互作用;Ⅲ和Ⅳ级红砂种群在所有取样范围均不相关。在西南坡,Ⅰ和Ⅱ级红砂种群在 0 ~1.5 m 范围为负相互作用,随着尺度的增加逐渐变为不相关;Ⅲ和Ⅳ级红砂种群在所有取样范围均不相关,而其他龄级之间在取样范围内均为负相关关系。在西坡和西北坡,除了Ⅲ和Ⅳ级红砂种群在所有取样范围内不相关外,而其他龄级之间在取样范围内均为负相关关系。

3 讨 论

红砂种群空间分布格局总体上呈现出多样性的空间分布格局。物种的空间格局与空间尺度之间关系密切,具有尺度效应[18-20],这些变化的空间分布格局和种内关系是其适应环境的结果,体现出它们对环境变化的响应[21]。在不同坡向,Ⅰ(幼龄)、Ⅱ级(青年期)红砂种群数量分布相对较多,而Ⅲ(中龄)和Ⅳ级(老龄期)红砂种群数量相比Ⅰ、Ⅱ级较少(图 2),表明红砂种群处于增长期。但从几个坡向来分析,Ⅱ级红砂个体数大于Ⅰ级,这有悖于种群的增长型规律。相关研究证实红砂种子的更新主要决定于开春种子发芽期间的土壤含水量[22],但本研究区位于黄土高原丘陵沟壑区,是水土流失侵蚀沟的发源地,土壤贫瘠,雨量相对较少,且年蒸发量是降雨量的 7.5 倍之多,土壤含水量的过少和土壤贫瘠在一定程度上影响了红砂种群种子的萌发。而Ⅱ级红砂种群在生境比较适宜的条件下,生长比较稳定,随着其树龄的增加,进入Ⅲ级后,由于有骆驼蓬、狗尾草等种间竞争和龄级大小之间的个体对光、水、热和养分等资源的激烈竞争,增大了环境选择力度,致使一些植株死亡,随即数量会减少。随着红砂生长接近生理衰老年龄(Ⅳ级),生活力和竞争力减弱,在环境筛选下红砂个体死亡增加,种群开始衰退,此时数量下降较快。

一般情况下,以母株为中心的幼龄物种的繁殖方式使它们展现出的是聚集分布;随着其不断长大,它们对光、热、水、气及养分元素的需求逐渐加大,加之种群之间的弱肉蚕食等作用,物种逐渐变为均匀分布;伴随物种不断的长大,年龄增大,种群会趋于随机分布[23]。

本研究发现,从Ⅰ级到Ⅳ级,变化规律比较明显,聚集分布的形式大多是Ⅰ、Ⅱ级植株;而随机分布形式大多是是Ⅲ级和Ⅳ级植株,这是因为红砂种群一方面存在不定根及根茎劈裂等无性繁殖,另一方面还有散落在母株周围的种子的繁殖是造成聚集分布的重要因素之一;到了中龄阶段,同时伴有物种之间和物种之内的竞争,并且将步入衰老阶段,红砂个体在环境过滤下死亡,这时其聚集程度随之减小,展现出随机分布状态。另一方面,微地形,比如坡向会对立地生境的太阳辐射、土温、水分及养分产生影响,以此影响植物的生长,进一步影响了植物种群的空间分布格局[24-25]。

本研究发现,南坡Ⅰ级红砂表现为明显的聚集分布,随着年龄的增长,其分布状况发生了改变,聚集强度逐渐降低,仅在小尺度内表现为聚集分布,大尺度以随机状态为主。这是因为幼小的物种个体有较小的竞争力,而其聚集在一起就会变成群体的力量,这样加强了物种间的竞争能力,伴随着研究区域的扩展,物种不断长大,聚集效应减小,最后成为了随机分布状态。沈志强等[26]对藏东南川滇高山栎种群不同生长阶段的研究表明小树、中树在小尺度上均呈明显的聚集分布,而大树在整个尺度上基本上呈随机分布;张营等[27]研究了山西太岳山主要树种空间分布格局,同样得出辽东栎(*Quercus wutaishansea*)、白桦(*Betula platyphylla*)、色木槭(*Acer mono*)、野山楂(*Crataegus cuneata*)种群从幼树到大树的发育阶段聚集程度不断减弱;在幼树时期表现

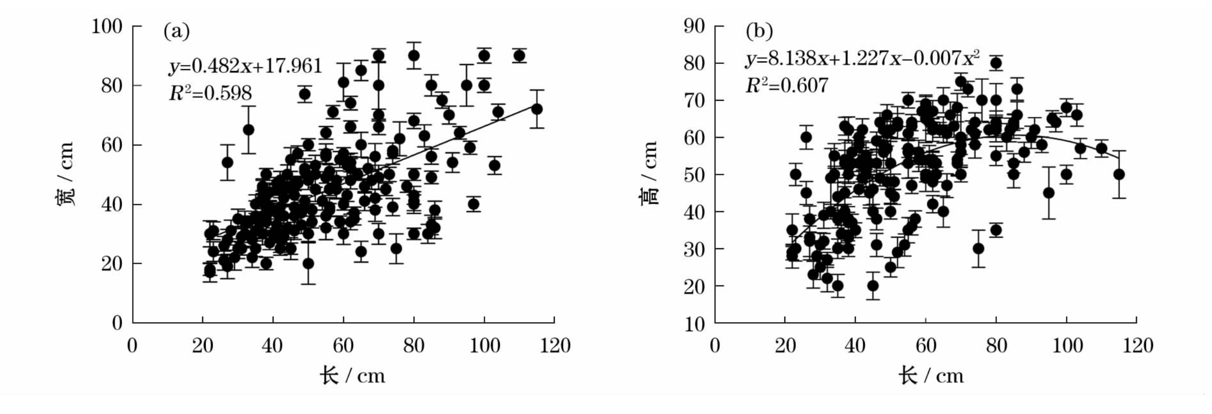


图 3　红砂冠幅长与宽、高的关系

Fig. 3　Relationship between the *Reaumuria soongarica* canopy leng, width and height

图 4　不同坡向红砂种群点格局分析

Fig. 4　Point pattern analysis of *Reaumuria soongarica* in different slope aspects

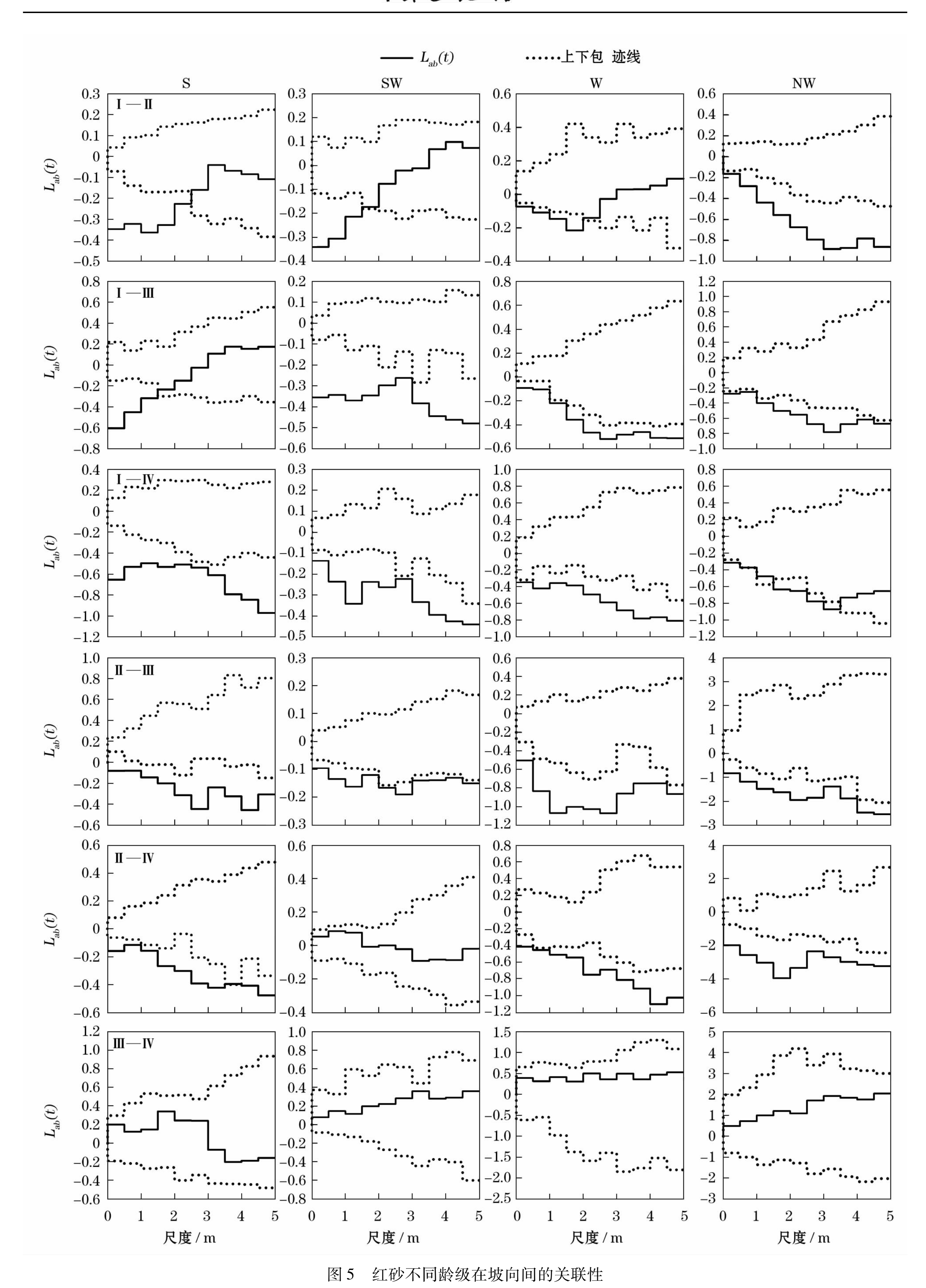


图 5 红砂不同龄级在坡向间的关联性

Fig. 5 Spatial association between different slope aspects of *Reaumuria soongarica*

为集群分布,在大树阶段随机分布,本研究与上述研究结果一致。西南坡Ⅰ级红砂呈聚集,Ⅱ级在0~4 m范围聚集分布,随着尺度的增加,4~5 m变为随机分布。

有研究认为,在小尺度范围内,植物种群的聚集分布有利于其自身形成群体效应,使它们增强种间竞争能力并很快适应环境,能促进种群的正常生长发展[28-29]。但当其生长到一定龄级阶段,对土壤养分、水分等环境资源的需求增加,由于激烈的竞争同样会产生自疏或他疏现象,因而Ⅲ、Ⅳ级红砂以随机分布为主。西坡处于西北坡与西南坡的过渡段,红砂分布数量相对减少(图2),但物种多样性增加,西坡物种数达16种之多,而南坡、西南坡只有5~8种,这使得西坡物种之间互相排斥,多样的物种为了存活而竞争水分养分等资源而使得西坡所有龄级红砂种群都表现为随机分布趋势。红砂种群的少量分布于西北坡主要源于西坡及西南坡种子的随机扩散,另一方面,西北坡的优势种如蓍状亚菊(*Ajania achilloides*)、短花针茅(*Stipa breviflora*)、甘肃锦鸡儿(*Caragana kansuensis*)及伴生种阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)、骆驼蓬子(*Peganum harmala*)等种群的大量生长来争夺有限养分、水分资源,造成了这个坡向上所有龄级的红砂种群都呈随机分布状态。

植物种群之间的空间关联分析结果是种群间空间关系的表现,正关联或负关联的这些特征可能是物种之间相互依存、相互竞争作用的结果,也可能是植物种间趋同或趋异的表象[30-31]。研究表明试验地红砂种群Ⅰ、Ⅱ级个体在一定尺度内表现为负关联,较大尺度为无关联(图5)。可能的原因是红砂种群幼小个体之间因竞争土壤养分及水分而相互排斥,使其在小尺度内呈现负相关;而在较大研究尺度内其个体在分布上相互独立,使环境资源得到充分的利用,导致在较大尺度上表现为无关联,这与Ⅲ、Ⅳ级个体之间为无关联的结果类似。Ⅲ、Ⅳ级个体与Ⅰ、Ⅱ级个体间的空间关联性为显著的负关联,表明较大个体的生长对幼小个体产生了抑制作用,这与刘旻霞[32]对高寒草甸金露梅种群在不同坡向条件下龄级个体空间关联研究结果相符。红砂种群在一定的资源限制下,Ⅲ、Ⅳ级等较大个体对土壤养分、水分及光热等的需求比竞争力较低的Ⅰ、Ⅱ级幼小个体更多,加上内部的竞争激烈,对于幼小个体的介入具有一定的排斥,因而抑制了幼小个体的生长发展。由此表明,红砂大小龄级之间的互相联系,具有空间分布的不均匀性和尺度大小的不均匀性。

4 结 论

(1) 皋兰老虎台红砂种群属于增长型。

(2) 不同龄级红砂的空间分布格局及空间关联性对坡向梯度有明显的响应,Ⅰ、Ⅱ级呈聚集分布较多,Ⅲ、Ⅳ级呈随机分布较多,龄级越接近,其表现出正相关关系,大龄级和幼龄之间表现出典型的负相关关系。

(3) 红砂种群的自然更新不仅受种间竞争影响,种内竞争也会对群落产生重要的影响。

(4) 红砂是甘肃中部黄土高原植被保护的重要组分种,在维护物种多样性、养护水源与防止水土流失等方面都具有非常重要的生态意义。

参考文献(References)

[1] ENGELS J G, RINK F, JENSENK K. Stress tolerance and biotic interactions determine plant zonation patterns in estuarine marshes during seedling emergence and early establishment[J]. Journal of Ecology, 2011, 99(1): 277-287.

[2] CRAIN C M, SILLIMAN B R, BERTNESS S L, et al. Physical and biotic drivers of plant distribution across estuarine salinity gradients[J]. Ecology, 2004, 85(9): 2539-2549.

[3] 张金屯. 植物种群空间分布的点格局分析[J]. 植物生态学报, 1998, 22(4): 344-349. [ZHANG Jintun. Analysis of spatial point pattern for plant species[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 1998, 22(4): 344-349.]

[4] FROST I, RYDIN H. Spatial pattern and size distribution of the animal-dispersed tree *Quercus robur* in two spruce-dominated forests[J]. Ecoscience, 2000, 7(1): 38-44.

[5] 刘顺, 吴珍花, 郭晓敏, 等. 不同林龄陈山红心杉土壤微生物群落结构特征[J]. 应用与环境生物学报, 2016, 22(3): 510-517. [LIU Shun, WU Zhenhua, GUO Xiaomin, et al. Soil microbial community structure characteristics of Chenshan Red-heart soil microbial community structure characteristics of Chenshan Red-heart Chinese fir of different stand ages[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology. 2016, 22(3): 510-517.]

[6] 张金屯, 孟东平. 芦芽山华北落叶松林不同龄级立木的点格局分析[J]. 生态学报, 2004, 24(1): 35-40. [ZHANG Jintun, MENG Dongping. Spatial pattern analysis of individuals in different age-classes of *Larix* principis-rupprechtii in Luya Mountain Reserve, Shanxi, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(1): 35-40.]

[7] WIEGAND T, GUNATILLEKE S, GUNATILLEKE N, et al. Analyzing the spatial structure of a Sri Lankan tree species with multiple scales of clustering[J]. Ecology, 2007, 88(12): 3088-3102.

[8] 宋于洋,李园园,张文辉. 基于 Ripley 的 $K(r)$ 函数和分形维数的梭梭种群空间格局[J]. 应用生态学报,2010,21(4):827－835. [SONG Yuyang, LI Yuanyuan, ZHANG Wenhui. Distribution pattern of Haloxylon ammodendron population based on Ripley's $K(r)$ function and fractal dimension[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2010,21(4):827－835.]

[9] RIPLEY B D. Modelling spatial patterns [J]. Journal of the Royal Statistical Society,1977,39(2):172－212.

[10] 张金屯. 数量生态学[M]. 北京:科学出版社,2004:264－268. [ZHANG Jintun. Numerical ecology[M]. Beijing: Science Press, 2004:264－268.]

[11] CHEN S Y, CHEN Z L, GUO P, et al. The roles of spatial pattern and size variation in shaping height inequality of plant population [J]. Bulletin of Mathematical Biology,2014,76(2):476－485.

[12] MRT D, POWELL R D. A new method for characterizing point patterns in plant ecology[J]. Journal of Vegetation Science,2001,12(5):597－608.

[13] 高茜,李毅,苏世平,等. 盐胁迫对红砂(*Reaumuria soongorica*)种子吸胀过程中生理特性的影响[J]. 中国沙漠,2014,34(1):83－87. [GAO Qian, LI Yi, SU Shiping, et al. Effects of salt stress on physiological charascteristics of *Reaumuria soongorica* seeds during imbibition[J]. Journal of Desert Research, 2014, 34(1):83－87.]

[14] 刘旻霞,赵瑞东,邵鹏,等. 近 15 a 黄土高原植被覆盖时空变化及驱动力分析[J]. 干旱区地理,2018,41(1):99－108. [LIU Minxia, ZHAO Ruidong, SHAO Peng, et al. Temporal and spatial variation of vegetation coverage and its driving forces in the Loess Plateau from 2001 to 2015[J]. Arid Land Geography, 2018, 41(1):99－108.]

[15] 单立山,李毅,段雅楠,等. 红砂幼苗根系形态特征和水分利用效率对土壤水分变化的响应[J]. 西北植物学报,2014,34(6):1198－1205. [SHAN Lishan, LI Yi, DUAN Yanan, et al. Response of root morphology and water use efficiency of *Reaumuria soongorica* to soil water change[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2014,34(6):1198－1205.]

[16] REYNOLDS J F, VIRGINIA R A, KEMP P R, et al. Impact of drought on desert shrubs: Effects of seasonality and degree of resource island development[J]. Ecological Monographs, 1999, 69(1):69－106.

[17] GRAY L, HE F. Spatial point-pattern analysis for detecting density-dependent competition in a boreal chronosequence of Alberta[J]. Forest Ecology and Management,2009,259(1):98－106.

[18] 刘树敏,杨就艳,清华,等. 内蒙古荒漠区红砂(*Reaumuria soongorica*)种群格局[J]. 中国沙漠,2016,36(5):1331－1339. [LIU Shumin, YANG Jiuyan, QING Hua, et al. Spatial patterns of *Reaumuria soongorica* in the desert area of Inner Mongolia[J]. Journal of Desert Research,2016,36(5):1331－1339.]

[19] 付贵全,徐先英,徐梦莎,等. 民勤绿洲边缘两种生境红砂种群空间格局及关联性分析[J]. 干旱区地理,2016,39(1):112－121. [FU Guiquan, XU Xianying, XU Mengsha, et al. Spatial point pattern and relevacy of *Reaumuria soongorica* population under the two habitats in Minqin oasis fringe[J]. Arid Land Geography, 2016,39(1):112－121.]

[20] 张璞进,清华,张雷,等. 内蒙古灌丛化草原毛刺锦鸡儿种群结构和空间分布格局[J]. 植物生态学报,2017,41(2):165－174. [ZHANG Pujin, QING Hua, ZHANG Lei, et al. Population structure and spatial pattern of *Caragana tibetica* communities in Nei Mongol shrub-encroached grassland[J]. Chinese Journal of Plant Ecology,2017,41(2):165－174.]

[21] LEVIN S A. The problem of pattern and scale in ecology: The Robert H. Macarthur award lecture[J]. Ecology,1992,73(6):1943－1967.

[22] 黄培佑. 荒漠区耐旱树种在异质生境中完成生活周期现象初探[J]. 新疆大学学报,1988,5(4):87－93. [HUANG Peiyou. A preliminary study on the live cycle of xerophilous arbor and shrub passed in dissimilar habitat in arid zone[J]. Journal of Xinjiang University,1988,5(4):87－93.]

[23] LI X, XIANG W, OU Z, et al. Clonal growth spatial pattern and dynamics of the endangered plant *Taxus mairei* population[J]. Acta Botanica Yunnanica,2003,25(6):625－632.

[24] 刘旻霞. 甘南高寒草甸植物元素含量与土壤因子对坡向梯度的响应[J]. 生态学报,2017,37(24):8275－8284. [LIU Minxia. Response of plant element content and soil factors to the slope gradient of alpine meadows in Gannan[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017,37(24):8275－8284.]

[25] 高涛涛,殷淑燕,王水霞. 基于 SPEI 指数的秦岭南北地区干旱时空变化特征[J]. 干旱区地理,2018,41(4):761－770. [GAO Taotao, YIN Shuyan, WANG Shuixia. Spatial and temporal variations of drought in northern and southern regions of Qinling Mountains based on standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Arid Land Geography. 2018. 41(4):761－770.]

[26] 沈志强,华敏,丹曲,等. 藏东南川滇高山栎种群不同生长阶段的空间格局与关联性[J]. 应用生态学报,2016,27(2):387－394. [SHEN Zhiqiang, HUA Min, DAN Qu, et al. Spatial pattern analysis and associations of *Quercus aquifolioides* population at different growth stages in southeast Tibet, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(2):387－394.]

[27] 张甍,李婷婷,张钦弟,等. 太岳山主要树种空间分布格局及其维持机制研究[J]. 西北植物学报,2017,37(4):782－789. [ZHANG Meng, LI Tingting, ZHANG Qindi, et al. Study on the spatial distribution pattern and maintaining mechanisms of dominant tree in Taiyue Mountain, Shanxi[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica,2017,37(4):782－789.]

[28] 梅军林,庄枫红,马姜明,等. 桂林喀斯特地区克隆生长红背山麻杆种群的点格局分析[J]. 生态学报,2017,37(9):3164－3171. [MEI Junlin, ZHUANG Fenghong, MA Jiangming, et al. Spatial point pattern analysis of *Alchornea trewioides* population clonal growth in the karst area of Guilin[J]. Acta Ecologica Sinica,2017,37(9):3164－3171.]

[29] BANCH C E. Plant spatial pattern and herbivore population dynamics: Plant factors affecting the movement patterns of a tropical cucurbit specialist (*Acalymma Innubum*)[J]. Ecology, 1984, 65

(1):175 – 190.

[30] 宗国,白雪娇,张淑媛,等.辽东山区次生林乔木幼苗分布格局与种间空间关联性[J].应用生态学报,2018,29(1):18 – 24.[ZONG Guo,BAI Xuejiao,ZHANG Shuyuan,et al. Spatial pattern and interspecific spatial association of tree seedlings in a secondary forest in montane region of eastern Liaoning Province,China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2018,29(1):18 – 24.]

[31] WILSON C,GUREVITCH J. Plant size and spatial pattern in a natural population of *Myosotis micrantha*[J]. Journal of Vegetation Science,2010,6(6):847 – 852.

[32] 刘旻霞.亚高寒草甸不同坡向金露梅种群的空间分布格局及空间关联[J].应用生态学报,2017,28(6):1817 – 1823.[LIU Minxia. Spatial distribution and spatial association of *Potentilla fruticosa* populations on different slope aspects in subalpine meadow[J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2017,28(6):1817 – 1823.]

Spatial pattern and correlation of *Reaumuria soongarica* in different slopes of Laohu Platform in Gaolan County

LIU Min-xia, NAN Xiao-ning, XIA Su-juan, LI Quan-di, JIANG Xiao-xuan

(*Geographical and Environmental Department*,*Northwest Normal University*,*Lanzhou* 730070,*Gansu*,*China*)

Abstract: The spatial pattern of the population was an important method to study the interaction of plant population and the relationship between the population and the environment. *Reaumuria soongarica* was the main species in arid region of Loess Plateau. Knowledge on the spatial pattern of *R. soongarica* can improve our understanding on adaptive characteristics of shrub to different slope aspects. Based on the field investigation,*R. soongarica* population spatial distribution pattern and its correlation were analyzed in different slopes by using Ripley *K* function method of spatial point pattern analysis of Gaolan County,Gansu Province,China. The spatial position of each *R. soongarica* individual in 10 m × 10 m study plot was determined in different slope aspects. The results showed that *R. soongarica* population was at the rising stage,and its distribution had significant differences in different slopes. Age class I and II individuals of *R. soongarica* population showed a significant aggregation distribution on the small scale,and clump intensity gradually weakened with the increase of age class and space scale,and finally tended to a random distribution in south and west south slope aspects. In west and north west slope aspects,the distribution pattern of all levels *R. soongarica* individuals were dominated by random distribution due to the growth of a large number of *Ajania achilloides* and *Stipa breviflora* caused by suppression and interspecific competition. In different slope aspect,*R. soongarica* populations between class I and II individual showed a negative correlation in small scale,but with scale increasing the correlation degree decreased. The relationship between class I with II and Ⅲ with Ⅳ individuals had negative correlation significantly. There was no significant relationship between the age III and IV,which showed that the individual with similar age was independent in spatial distribution. In the arid region of the Loess Plateau, the main influence factors of *R. soongarica* population distribution were its own biological and ecological characteristics,and the influence of microhabitats was also very important. This paper could provide technical support for the control of soil erosion in Gansu Province.

Key words: Loess Plateau; *Reaumuria songarica* population; age-class structure; point pattern; slope aspects